

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.06.001

# 河南民权与陕西白水刺槐径向生长与水分利用效率对气候响应的差异

周佳<sup>1,2</sup>, 孟平<sup>1,2</sup>, 张劲松<sup>1,2</sup>, 管崇帆<sup>1,2</sup>, 孙守家<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

**摘要:** [目的] 分析不同地区刺槐径向生长、内在水分利用效率 ( $WUE_i$ ) 对气候因子响应的差异, 确定影响其生长和水分利用的主导因子, 为我国刺槐人工林在气候变化背景下的管理经营提供参考。[方法] 在河南民权 (MQ) 与陕西白水 (BS) 两地, 利用树木年代学方法建立刺槐轮宽年表, 测定树轮稳定碳同位素值 ( $\delta^{13}C$ ), 计算刺槐年际间的  $WUE_i$ , 结合气象资料分析刺槐径向生长与  $WUE_i$  对气候响应的差异。[结果] 两地刺槐林龄相似且民权刺槐轮宽随着林龄的增加呈线性下降趋势, 白水呈“升-降”曲线变化。两地刺槐的胸高断面面积增量 (BAI) 变化趋势相似, 均呈“升-降”的曲线。民权刺槐的  $\delta^{13}C$  和  $WUE_i$  均低于白水刺槐。Pearson 相关结果显示: 月尺度上, 两地刺槐标准化年表 (STD) 指数主要与夏季降水和干旱指数 (SPEI) 显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 且白水刺槐与上年 11 月平均降水、SPEI 显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 民权刺槐  $WUE_i$  与当年 3 月和 8 月的平均温度、最高温度显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 白水刺槐  $WUE_i$  与当年 3、4 月、上年及当年 6、7 月平均温度、最高温度和最低温度显著正相关 ( $P < 0.05$ )。路径分析模型表明, 年尺度上, 白水县刺槐 STD 指数与平均降水、平均温度存在显著正效应 ( $P < 0.05$ ), 而民权刺槐对气候因子响应不显著; 两地刺槐  $WUE_i$  均与平均温度存在显著正效应 ( $P < 0.05$ )。[结论] 平均降水是两地刺槐径向生长的主导因子, 白水刺槐生长对平均降水的敏感性高于民权刺槐, 平均温度是两地刺槐  $WUE_i$  的主导因子, 白水刺槐  $WUE_i$  较民权刺槐对温度变化更敏感。

**关键词:** 刺槐; 树轮; 径向生长; 稳定碳同位素; 内在水分利用效率

**中图分类号:** S792.27

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)06-0001-08

IPCC 报告显示, 在 2030—2052 年, 全球平均气温将比工业革命前提高  $1.5^{\circ}C$ , 气候变暖引发的干旱、高温等极端气候事件将对森林生态系统产生巨大影响。于健等<sup>[1]</sup>与赵学鹏等<sup>[2]</sup>研究发现, 气候持续变暖对长白山树木径向生长及地理分布范围产生较大影响。理清树木生长对气候变化的响应机制, 有利于制定合理的森林经营对策。树轮包含了树木生命周期中的气候信息, 是分析气候变化的重要材料; 然而, 随着树轮-气候响应研究的深入, 国内外学者对美国<sup>[3]</sup>、匈牙利<sup>[4]</sup>和新疆天山<sup>[5]</sup>等地

区不同树种生长研究发现, 轮宽对气候因子敏感性降低, 利用其对气候进行重建会出现偏差, 而树轮中的稳定碳同位素 ( $\delta^{13}C$ ) 组成可以准确反映大气的  $^{13}C/^{12}C$  变化, 对气候因子响应比轮宽更敏感<sup>[6]</sup>。将轮宽和稳定碳同位素综合分析有助于解释树木生长和长期水碳平衡与气候变化的关系, 国内外学者依据树轮中的  $\delta^{13}C$  来推导年际水分利用效率, 研究了瑞士石松 (*Pinus cembra* L.)<sup>[7]</sup> 和川西云杉 (*Picea likiangensis* var. *balfouriana* (Rehd. et Wils.) Hillier ex Slsvin)<sup>[8]</sup> 的水分利用效率对气候的响应, 但同一

收稿日期: 2021-03-31 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目课题 (2020YFA0608101); 国家自然科学基金面上项目 (32171871) 和南京林业大学南方现代林业协同创新中心项目资助

\* 通讯作者: 孙守家, 研究员, 硕士生导师。主要研究方向: 植物水分生理生态。电话: 13161793988。Email: ssj1011@163.com

树种对不同地点气象因子的响应可能不同。为了更好地理解植物对气候变化的生理响应过程,需要进一步加强对同一树种内在水分利用效率( $WUE_i$ )空间变异及关键影响因子响应的研究。

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)为豆科、刺槐属植物,其根系浅而发达,适应性强,为我国水土保持和植被恢复的先锋树种,但受不同地点环境条件的影响,导致其生长差别较大,适应环境的刺槐生长较好,反之,则出现枯梢和退化等现象。先前研究发现,黄土高原刺槐径向生长与年均温度<sup>[9]</sup>和帕默尔干旱指数(PDSI)<sup>[10]</sup>显著正相关,但主要分析了刺槐生长与气候的关系,而对刺槐水碳利用与气候因子的关系认识不足。刺槐对环境的响应是一个长期过程,需在水碳方面保持相对平衡, $WUE_i$ 是碳同化速率与气孔导度的比值,将水碳耦合在一起,能够解释树木在年际尺度上对气候变化的生理响应机制<sup>[11]</sup>。因此,本研究以河南省民权县与陕西省白水两县两地林龄相近的刺槐林为研究对象,通过测定轮宽与 $\delta^{13}\text{C}$ ,计算胸高断面面积增量(BAI)和 $WUE_i$ ,回溯性分析不同地点刺槐径向生长和水分利用对气候因子响应的差异,确定影响刺槐生长和水分利用效率的主导气候因子,理清不同地点刺槐水碳利用对气候因子响应的差异,为今后气候变化背景下刺槐人工林的树种更新、结构优化和营林管理等提供参考。

## 1 研究区概况

民权县(114°49'~115°27' E, 34°32'~34°52' N, 海拔90 m)位于河南省商丘市,暖温带大陆性带季风气候,四季分明,夏季雨热同期,年均降水量约679 mm,年均气温约14℃,年活动积温约5 192.6℃,年均日照时数约2 365.5 h。白水县(109°16'~109°45' E, 35°4'~35°27' N, 海拔1 210 m)位于陕西省渭南市,属暖温带半湿润半干旱季风气候,四季分明,光照条件好,年均降水量约577.8 mm,但分布不均匀,年均气温约11.4℃,年活动

积温约3 546.4℃,年均日照时数约1 851.9 h。

## 2 研究方法

### 2.1 样芯的采集与处理

以国际树木年轮数据库(ITRDB)为采样准则<sup>[12]</sup>,于2020年6月在民权县国营民权林场和白水县新卓国有林场分别随机设置6块20 m×20 m样方,测定刺槐胸径、树高、郁闭度等指标(表1),民权与白水的刺槐林龄相近,密度相差约10%,且民权刺槐树高与胸径均大于白水。使用生长锥在两地随机选取生长状况良好的100株刺槐钻取树芯,每株沿东西、南北方向各取1根,待样芯自然晾干后使用不同目数的砂纸进行打磨,直至样芯年轮清晰可见。

### 2.2 树轮宽度测定及年表建立

使用Lintab 6年轮分析仪(Rinntech公司,德国)与TASP-Win软件测定样品轮宽并进行交叉定年,精确至0.01 mm;使用COFECHA、ARSTAN程序构建刺槐年表<sup>[13]</sup>,最终民权与白水两个样地分别选用154、160根样芯制作年表。经对比发现,剔除生长趋势及非气候信息的干扰后,标准化年表(STD)中保留较多的低频气候信息,因此,本文选用标准化年表指数对刺槐径向生长进行分析。胸高断面面积增量(BAI,  $\text{cm}^2$ )能较好反映树木生长量大小,用轮宽数据计算:

$$BAI = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2) \quad (1)$$

式(1)中: $R$ 为树木半径/cm, $n$ 为年轮形成年份。

### 2.3 稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )测定

已有研究证实,选取4棵树的4根样芯测定 $\delta^{13}\text{C}$ ,结果基本可代表研究区 $\delta^{13}\text{C}$ 的绝对含量和变化趋势<sup>[14]</sup>。因此,从两地各选取4根年轮清晰的样品逐年剥离,进行称量、烘干、粉碎及过筛等步骤后放入TOC(Elementar Analysensysteme,德国)内充分燃烧,利用气体混合仪(Li-6000,中国)及LGR CO<sub>2</sub>同位素测定仪(LGR-912,美国)测量 $\delta^{13}\text{C}$ 值,每30样品插入一个标准样进行校准,测定精度0.1‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值采用维也纳白垩系皮狄组地

表1 样地情况统计

Table 1 Statistical description of plots.

样地 Sample plots	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔/m Altitude	样树/样芯 Tree/Cores	时间 Time span	树龄/a Stand age	平均树高/m Average height	平均胸径/cm Average DBH	郁闭度/% Canopy density	密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) Density
民权MQ	115°4'48"	34°43'54"	90	77/154	1981—2018	38	17.2±1.2	35.95±1.1	0.64±0.2	896±66
白水BS	109°22'3"	35°16'56"	1 210	80/160	1979—2018	40	14.6±1.5	28.65±1.3	0.73±0.1	983±41

层内美洲拟箭石 (VPDB) 标准, 计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式(2)中:  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{standard}}$  为样品与标准物  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的摩尔比率。

## 2.4 树轮的 $WUE_i$ 计算

为避免树轮  $\delta^{13}\text{C}$  记录气候信息受工业革命影响, 依据 McCarroll 与 NOAA 的方法对其进行校正<sup>[16]</sup>, 树轮中稳定碳同位素辨别值 ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) 可由 Farquhar<sup>[17]</sup> 等公式计算:

$$\Delta^{13}\text{C} = \left( \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{tree}}}{1 + \delta^{13}\text{C}_{\text{tree}}/1000} \right) \quad (3)$$

式(3)中:  $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{tree}}$  分别为大气  $\delta^{13}\text{C}$  值和树轮中  $\delta^{13}\text{C}$  值; 对  $\text{C}_3$  植物,  $\Delta^{13}\text{C}$  与胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_a$ ) 和大气  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 线性关系有关<sup>[18]</sup>,  $WUE_i$  可通过  $\Delta^{13}\text{C}$  与  $C_a$  值之间的关系计算获得<sup>[19]</sup>

$$WUE_i = \frac{C_a(b - \Delta^{13}\text{C})}{1.6(b - a)} \quad (4)$$

式(4)中: 数值 1.6 为水蒸汽和  $\text{CO}_2$  在空气中扩散比率,  $a = 4.4\text{‰}$ ,  $b = 27\text{‰}$ , 分别表示  $\text{CO}_2$  扩散及羧化过程的同位素分馏系数。

## 2.5 气象资料与数据分析

气象数据来自国家气象局, 民权与白水气象数据分别采用离采样点较近的商丘气象站 ( $34^{\circ}27' \text{N}$ ,  $115^{\circ}40' \text{E}$ , 海拔 50.1 m) 和洛川气象站 ( $35^{\circ}49' \text{N}$ ,  $109^{\circ}30' \text{E}$ , 海拔 1 159.8 m), 干旱指数 (SPEI) 使用软件 SPEI 计算<sup>[20]</sup>。本文使用 SPSS 完成 Pearson 相关分析, R 语言软件绘制 Pearson 相关关系图, AMOS.22(IBM, 美国) 建立结构方程模型。

## 3 结果与分析

### 3.1 气象因子变化

图 1 表明: 1979—2018 年, 民权县年降水量高于白水县, 且呈递增趋势, 两地年最高降水量均出现在 2003 年, 均超过 900 mm。两地年均温度呈上升趋势, 白水县整体低于民权约  $4^{\circ}\text{C}$  左右。民权县相对湿度呈下降趋势, 白水县低于民权约 10% 左右且趋于稳定。民权县干旱指数呈上升趋势, 干旱情况在逐渐缓解, 白水县则相对稳定。月尺度上, 两地月最高降水量、最高气温均出现在 7 月, 白水县月均降水、月均气温及月均相对湿度均低于民权县, 在夏季的差异尤为明显。

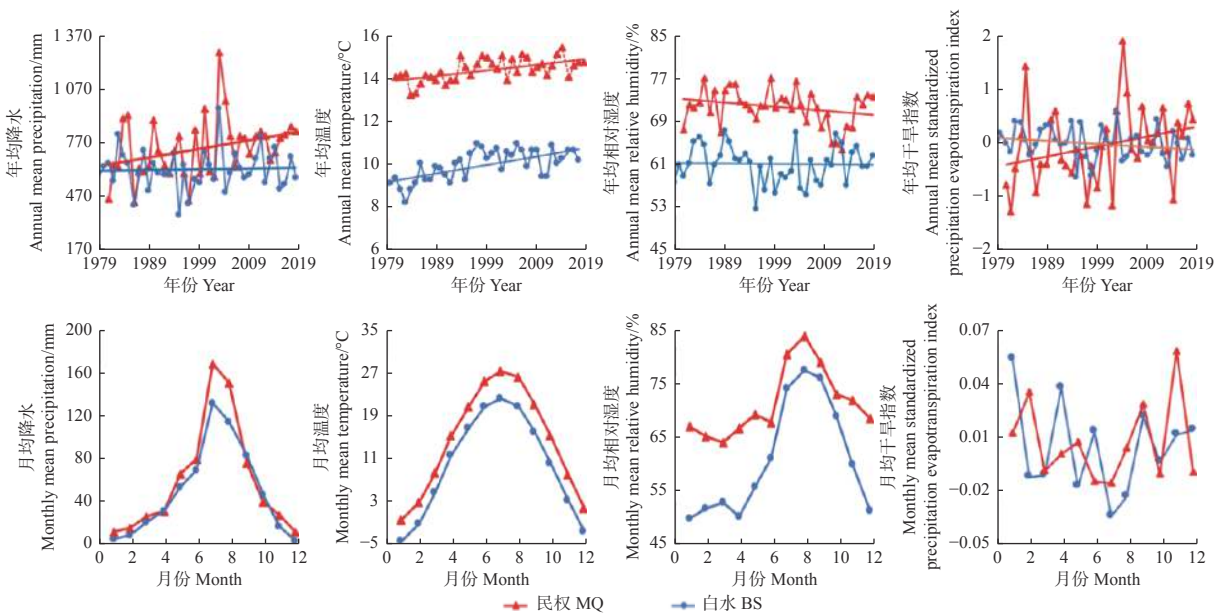


图 1 民权县与白水县降水、温度、相对湿度和干旱指数的年际与月际变化

Fig. 1 Variation in precipitation, temperature, relative humidity and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) during the study period at MQ and BS at annual and monthly timescale.

### 3.2 刺槐标准化年表指数变化及其差异

图 2 显示: 民权县刺槐标准化年表 (STD) 指数前期与后期波动较大, 在 1984 年出现峰值,

1993—2001 年处于较低水平, 2000 年至 2004 年呈上升趋势, 2004 后逐渐下降。白水县 STD 指数趋势整体波动较小, 介于 0.8~1.2。

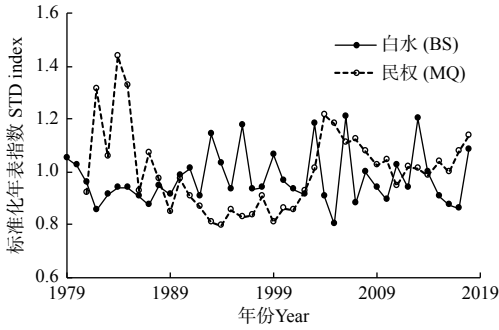


图2 民权县和白水县刺槐标准化年表指数  
Fig. 2 STD index of *Robinia pseudoacacia* at MQ and BS sites

### 3.3 刺槐年轮宽度与胸高断面积增量 (BAI) 的差异

图3表明：两地轮宽变化趋势差异较大，民权县刺槐年际轮宽变化呈明显下降趋势，1981—2018下降约75.2%，白水县轮宽年际变化呈“升降”趋势，1993年出现峰值。两地BAI随年份增加

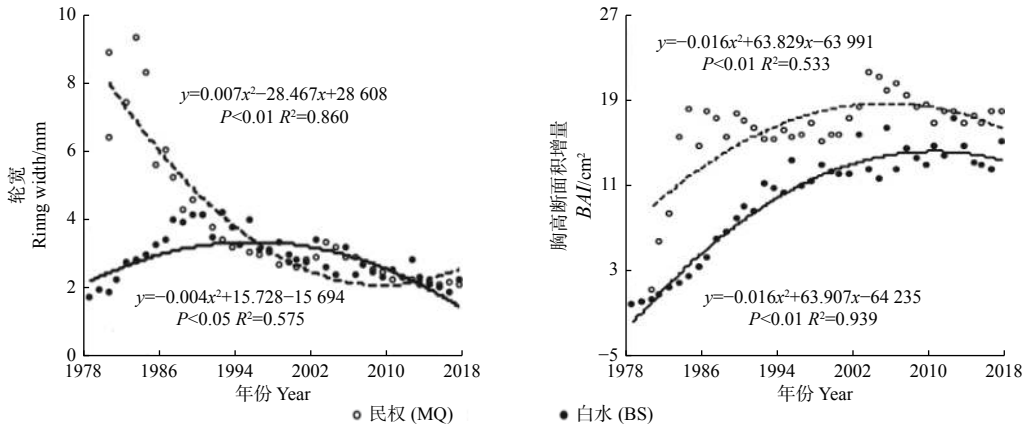


图3 民权县与白水县刺槐轮宽和胸高断面积增量的差异

Fig. 3 Differences in tree-ring width and BAI of *Robinia pseudoacacia* at MQ and BS sites

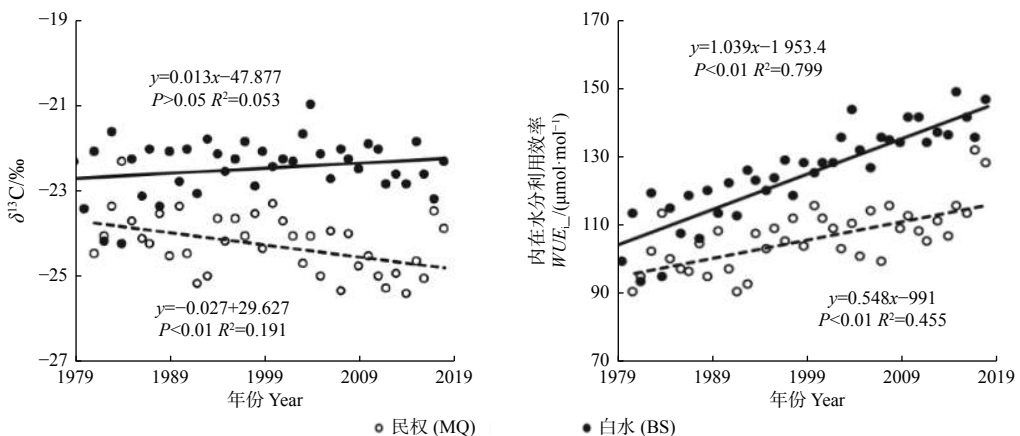


图4 民权县与白水县刺槐树轮中稳定碳同位素与内在水分利用效率差异

Fig. 4 Differences in of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $WUE_i$  of *Robinia pseudoacacia* at MQ and BS sites

的变化曲线均呈极显著二次曲线关系 ( $P < 0.01$ ), 后期均出现下降趋势, 民权刺槐BAI自2008年开始下降, 早于白水县约6a, 但整体BAI下降趋势不明显。

### 3.4 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $WUE_i$ 差异

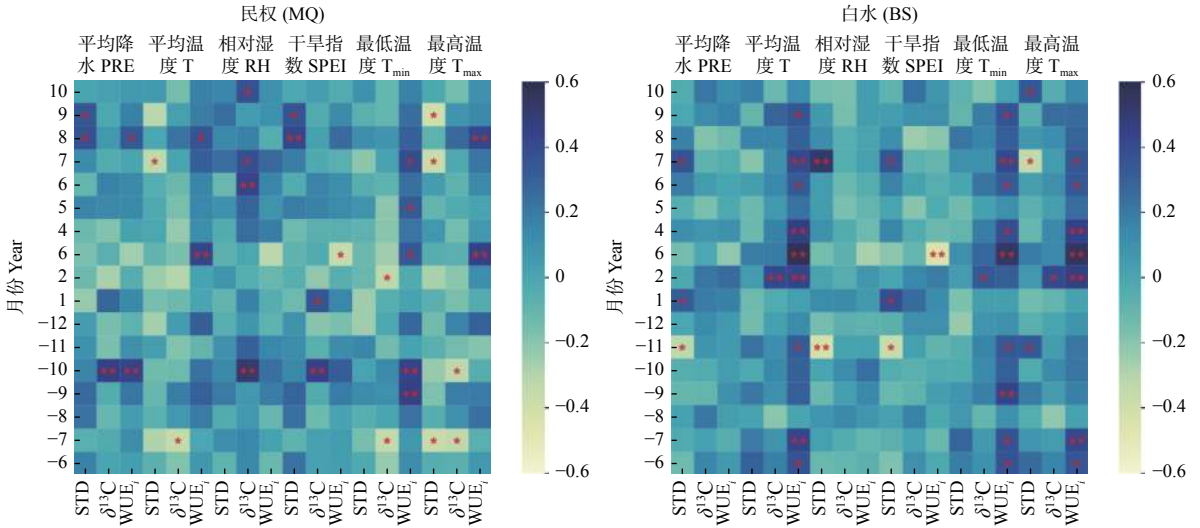
图4表明： $\delta^{13}\text{C}$ 序列没有因幼龄效应表现显著上升趋势，民权县树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值随时间呈极显著下降趋势 ( $P < 0.01$ )，白水县呈不显著的小幅度上升 ( $P > 0.05$ )，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体高于民权县。两地刺槐树轮 $WUE_i$ 均表现为随时间呈极显著上升趋势 ( $P < 0.01$ )，白水县的 $WUE_i$ 整体高于民权县，但白水县刺槐方程斜率为1.03，高于民权县刺槐的0.54，表明白水县刺槐的 $WUE_i$ 升高较快。

### 3.5 刺槐STD指数、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $WUE_i$ 与月气候因子的关联

图5显示：民权县刺槐STD指数与当年8、9月平均降水及SPEI呈显著或极显著正相关 ( $P <$

0.05,  $P < 0.01$ ), 与当年7月的平均温度及7、9月的最高温度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。  $\delta^{13}\text{C}$  与上年10月平均降水、相对湿度、 $SPEI$  呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与上年7月平均温度、最低温度、最高温度均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。  $WUE_i$  与上年10月平均降水、上年9、10月的最低温度、当年3月

的平均温度和最高温度、当年3、8月的最高温度呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与当年8月的平均降水、平均温度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。 总体来看, 民权县刺槐径向生长、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $WUE_i$  受上年10月、当年3月和8月的气象因子影响较大, 而  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $WUE_i$  比径向生长更易受到气象因子的影响。



注: \*表示显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ ); -为上年月份。

Notes: \*, the correlation is significant at the 0.05 level. \*\*, the correlation is significant at the 0.01 level, -for the month of last year.

图5 民权县(左)与白水县(右)标准化年表指数、稳定碳同位素、内在水分利用效率与月尺度气象因子的关联  
Fig. 5 The STDindex,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $WUE_i$  related with monthly meteorological factors in MQ(left) and BS(right).

白水县刺槐 STD 指数与当年7月的平均降水、相对湿度、 $SPEI$  呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ), 而与上年11月的平均降水、相对湿度、 $SPEI$  呈显著或极显著负相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。  $\delta^{13}\text{C}$  与当年2月平均温度、最低温度和最高温度呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。  $WUE_i$  与上年及当年6、7月、当年3、4月平均温度、最低温度和最高温度呈显著或极显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。 总体看, 白水县刺槐径向生长受夏季降水和  $SPEI$  影响较大,  $WUE_i$  受上年和当年生长季温度影响较大。与径向生长和  $\delta^{13}\text{C}$  相比, 白水刺槐的  $WUE_i$  更易受到气象因子特别是温度的影响。

### 3.6 刺槐 STD 指数、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $WUE_i$ 与年气象因子的关联

路径分析结果 (图6) 显示: 在民权县, 年尺度气象因子对刺槐 STD 指数无显著效应 ( $p > 0.05$ ); 相对湿度对  $\delta^{13}\text{C}$  有显著正效应 ( $P < 0.05$ ), 平均温度对  $\delta^{13}\text{C}$  有极显著负效应 ( $P < 0.01$ ), 最高温度对  $\delta^{13}\text{C}$  有极显著正效应 ( $P < 0.01$ ); 平均降水和最高

温度对  $WUE_i$  有显著正效应 ( $P < 0.05$ ),  $SPEI$  和平均温度对  $WUE_i$  有极显著正效应 ( $P < 0.01$ )。 在白水县, 平均降水与平均温度对刺槐 STD 指数有极显著正效应 ( $P < 0.01$ ), 而最高温度与最低温度有极显著负效应 ( $P < 0.01$ );  $SPEI$  对刺槐  $\delta^{13}\text{C}$  有显著正效应 ( $P < 0.05$ ), 最低温度和最高温度对  $\delta^{13}\text{C}$  有极显著负效应 ( $P < 0.01$ ), 平均温度对  $\delta^{13}\text{C}$  有极显著正效应 ( $P < 0.01$ ); 相对湿度对  $WUE_i$  有显著正效应 ( $P < 0.05$ ), 平均温度对  $WUE_i$  有极显著正效应 ( $P < 0.01$ ), 最低温度对  $WUE_i$  有极显著负效应 ( $P < 0.01$ )。

## 4 讨论

### 4.1 刺槐径向生长对气象因子的响应

受海拔影响, 白水县温度明显低于民权县, 降水和湿度也较低,  $SPEI$  变幅较小。两地刺槐径向生长也表现出明显差别, 民权县刺槐年际轮宽变化呈明显下降趋势, 白水县呈“升-降”趋势, 表明民权县高温高湿的环境促进了刺槐前期径向生长, 而较

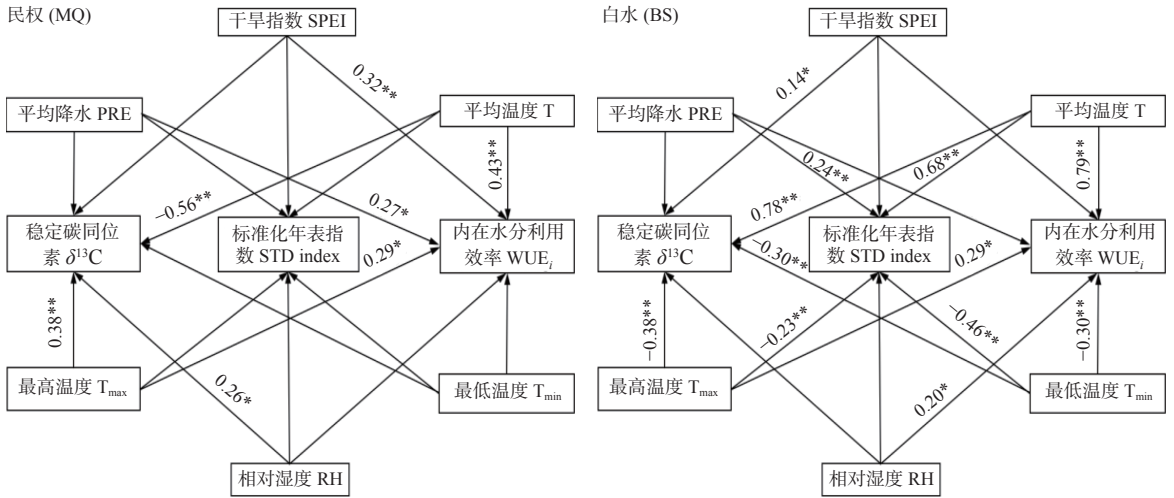


图6 刺槐标准化年表指数、稳定碳同位素、内在水分利用效率与年气象因子路径分析

Fig. 6 Path analysis for STD index,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $WUE_i$  of *Robinia pseudoacacia* with meteorological factors

低的温度及干燥的气候则使白水刺槐前期径向生长缓慢。两地刺槐  $BAI$  与年龄均呈二次曲线变化,其原因在于刺槐生长后期随树龄增加生长速度逐渐下降。

树木径向生长与当年气象因子及上年生长季后期和非生长季的气候因子密切相关。本研究中,两地刺槐 STD 指数与夏季降水和  $SPEI$  显著正相关,且民权刺槐与当年夏季最高温度呈负相关,白水刺槐与上年 11 月平均降水、 $SPEI$  显著负相关,这与李宗善等<sup>[21]</sup> 观测到辽东栎对降水与温度的响应结果类似,可能是夏季高温导致刺槐部分气孔关闭,光合作用下降,限制刺槐径向生长,而充沛的降水利于土壤水源补充,促进了刺槐生长季后期及来季生长季初期的径向生长,秋季水分亏缺使植物根系活动受限,不利于有机物储存,在一定程度上影响来季生长量。

在年尺度上,两地刺槐径向生长对气候响应的规律不明显。白水县年均降水、年均温度对刺槐 STD 指数为显著正效应,年最高温及年最低温为显著负效应,而民权刺槐 STD 指数与年尺度气候因子关系不显著,这与 Aryal 等<sup>[22]</sup> 研究不同海拔落叶松径向生长的结果一致,可能是刺槐对温度较敏感,高温与低温环境均不利于其生长,白水县海拔较高,温度与降水成为限制刺槐生长关键因子。民权气候较适宜,年均降水充沛、年均温度稳定,刺槐生长受到年际间气候因子变化影响较小。

#### 4.2 刺槐 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $WUE_i$ 对气象因子的响应

由于对环境资源的利用策略不同,不同地点树木之间的  $\delta^{13}\text{C}$  与  $WUE_i$  表现出明显差别。随着工业

排放增加,大气  $\text{CO}_2$  浓度持续升高和  $\delta^{13}\text{C}$  值降低影响了树木碳同化<sup>[23]</sup>,导致  $WUE_i$  升高,民权和白水刺槐  $WUE_i$  随生长均呈极显著上升趋势印证了这种现象。

民权刺槐  $\delta^{13}\text{C}$  与上年 10 月平均降水、 $SPEI$  和相对湿度呈正相关,与夏季高温呈负相关,可能是高温影响了树木的光合速率,限制了树木  $\delta^{13}\text{C}$  分馏。10 月刺槐生理活动并未完全停止,此时优越的水分条件显著影响刺槐  $\delta^{13}\text{C}$  变化。而白水刺槐  $\delta^{13}\text{C}$  与 2 月温度呈正相关,这与朱娜等<sup>[24]</sup> 对油松树轮的研究结果一致,但 2 月刺槐尚未发芽,可能是当温度回升至  $0^\circ\text{C}$  以上,刺槐早春生理活动开始恢复,储存的碳水化合物中  $\delta^{13}\text{C}$  出现分馏现象。

$WUE_i$  对多种气候因素非常敏感,尤其是干旱、温度和  $\text{CO}_2$  浓度。在民权县,刺槐  $WUE_i$  与 3 月温度正相关,而与  $SPEI$  负相关,这表明早春气温升高,促使刺槐生理活动恢复,但此时较干旱,使刺槐的  $WUE_i$  提高;而夏季民权刺槐  $WUE_i$  与降水和温度显著正相关,这与 Tian 等<sup>[25]</sup> 观测到西南林区水分利用效率与降水呈负相关的结果不同,可能是当水分充足时,温度升高使光合速率增加幅度超过了气孔导度,进而导致  $WUE_i$  上升。白水刺槐  $WUE_i$  与生长季的温度显著正相关,可能是由于生长季期间温度升高导致树木光合作用加强,从而提高了  $WUE_i$ 。

在年尺度上,年均温度均对两地刺槐  $WUE_i$  存在显著正效应,表明温度是影响两地刺槐  $WUE_i$  的关键因子。此外,民权刺槐  $WUE_i$  与年  $SPEI$ 、年

均降水也存在显著正效应,这与路伟伟等<sup>[26]</sup>研究油松水分利用效率结果一致,可能是温度与降水同时对树木  $WUE_i$  变化产生作用,但水分对树木  $WUE_i$  的影响小于温度的作用,导致刺槐  $WUE_i$  对温度更敏感。

## 5 结论

民权刺槐的径向生长在前期较快,生长量明显高于白水刺槐,  $\delta^{13}C$  和  $WUE_i$  则均低于白水刺槐,主要与生长地点气候条件不同有关。两地刺槐径向生长对气候因子响应差异较大,平均降水是主要的主导因子,且白水刺槐生长对平均降水、平均温度等气候因子的敏感性高于民权。两地刺槐  $WUE_i$  对气候因子响应基本一致,但存在部分差别,平均温度为主导因子,民权刺槐  $WUE_i$  对平均降水等水分条件依赖性高于白水,白水刺槐  $WUE_i$  较民权刺槐对温度变化更敏感。气候变化尤其是温度升高,将对白水刺槐水分利用产生较大影响,因此,在黄土高原刺槐造林时需要充分考虑温度和水分条件,保持合理的结构和密度。

## 参考文献:

- [1] 于健,陈佳佳,孟盛旺,等.长白山群落交错带长白松和鱼鳞云杉径向生长对气候变暖的响应[J].应用生态学报,2021,32(1): 46-56.
- [2] 赵学鹏,白学平,李俊霞,等.气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应[J].生态学杂志,2019,38(3): 637-647.
- [3] 白孟鑫,郑景云,郝志新,等.20世纪以来美国树木生长响应气候变化敏感度的时空差异[J].地理研究,2019,38(4): 822-830.
- [4] Dávid M, Katalin N. Growth response of Scots pine to changing climatic conditions over the last 100 years: a case study from Western Hungary[J]. Trees, 2017, 31(3): 919-928.
- [5] 盖学瑞,于大炮,王守乐,等.树轮-气候“分异问题”形成机制的研究进展[J].生态学杂志,2017,36(11): 3273-3280.
- [6] Fan Y T, Shang H M, Wu Y, et al. Tree-Ring Width and Carbon Isotope Chronologies Track Temperature, Humidity, and Baseflow in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Forests, 2020, 11(12): 1308.
- [7] Gerhard W, Walter O, Barbara W, et al. Long-term trends in leaf level gas exchange mirror tree-ring derived intrinsic water-use efficiency of *Pinus cembra* at treeline during the last century[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248(248): 251-258.
- [8] Wang Y, Zhang Y, Fang Q Y, et al. Long-term changes in the tree radial growth and intrinsic water-use efficiency of Chuanxi spruce (*Picea likiangensis* var. *balfouriana*) in southwestern China[J].

Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(6): 833-844.

- [9] 李敏敏.晋西黄土高原刺槐油松生产力及其与气候因子的关系[D].北京:北京林业大学,2017.
- [10] 韦景树,李宗善,焦磊,等.黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异[J].生态学报,2018,38(22): 8040-8050.
- [11] 徐庆,王婷,高德强.碳氢氧稳定同位素在草地生态系统水循环研究中的应用[J].林业科学研究,2019,32(6): 130-136.
- [12] 徐静,郭滨德,孙洪志.帽儿山地区不同种源樟子松树轮对气候因子的响应[J].林业科学研究,2016,29(4): 581-586.
- [13] 曹仁杰,尹定财,田昆,等.丽江老君山海拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)径向生长对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(17): 6067-6076.
- [14] 阮亚男,萧英男,杨立新,等.大连市黑松树木水分利用效率的环境响应[J].应用生态学报,2017,28(9): 2849-2855.
- [15] 孙守家,李春友,何春霞,等.基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J].应用生态学报,2017,28(7): 2119-2127.
- [16] McCarroll D, Loader N J, et al. Stable isotopes in tree rings[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(13): 771-801.
- [17] Farquhar G D, O'Leary M H, et al. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Functional Plant Biology, 1982, 9(2): 121-137.
- [18] Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes[J]. Functional Plant Biology, 1984, 11(6): 539-552.
- [19] Wang W Z, McDowell N G, Pennington S, et al. Tree growth, transpiration, and water-use efficiency between shoreline and upland red maple (*Acer rubrum*) trees in a coastal forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 295(5): 1-12.
- [20] Vicente S, Sergio M, Begueria, et al. A multiscale drought index sensitive to Global Warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1710.
- [21] 李宗善,陈维梁,韦景树,等.北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征[J].生态学报,2021,41(1): 27-37.
- [22] Aryal P C, Man K D, Gaire N P, et al. Tree-ring climate response of two *Larix species* from the central Nepal Himalaya[J]. Tropical Ecology, 2020, 61(2): 215-225.
- [23] 刘小英,段爱国,张建国,等.不同种源杉木树轮 $\alpha$ 纤维素 $\delta^{13}C$ 对气候因子的响应[J].林业科学研究,2020,33(2): 9-18.
- [24] 朱娜,陈红林,张群,等.秦岭南坡油松树轮碳稳定同位素对气候因子的响应[J].西北林学院学报,2019,34(3): 21-27.
- [25] Tian J X, Zhang Z X, Kong R, et al. Changes in water use efficiency and their relations to climate change and human activities in three forestry regions of China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 144(6): 1297-1310.
- [26] 路伟伟,余新晓,贾国栋,等.基于树轮 $\delta^{13}C$ 值的北京山区油松水分利用效率[J].生态学报,2017,37(6): 2093-2100.

# Differences in the Response of Radial Growth and Intrinsic Water Use Efficiency of *Robinia pseudoacacia* to Climatic Factors in Minquan of He'nan Province and Baishui of Shaanxi Province

ZHOU Jia<sup>1,2</sup>, MENG Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1,2</sup>, GUAN Chong-fan<sup>1,2</sup>, SUN Shou-jia<sup>1,2</sup>

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the response of radial growth and intrinsic water use efficiency ( $WUE_i$ ) of *Robinia pseudoacacia* to climate factors at different locations, and to determine the dominant factors affecting the growth and water use mechanism, so as to provide reference for the management of *R. pseudoacacia* plantations in China under climate change. [Method] The ring width chronologies were established in Minquan (MQ) of He'nan Province and Baishui (BS) of Shaanxi Province. The stable carbon isotopic composition ( $\delta^{13}C$ ) of tree ring was measured to calculate the  $WUE_i$ . The differences in the response of *R. pseudoacacia* to climatic variation were analyzed with meteorological data. [Result] The plantations at the two locations were in similar age. The tree-ring width at BS presented a trend of initially increasing and thereafter decreasing with the increase of tree age, whereas at MQ, the tree-ring width showed a linear decreasing trend with tree age increase. The trends of basal area increment ( $BAI$ ) of *R. pseudoacacia* at the two locations were similar, presenting a trend of initially increasing and thereafter decreasing with the increase of tree age. The  $\delta^{13}C$  value and  $WUE_i$  of the trees in MQ were lower than those of BS. The Pearson correlation results showed that on a monthly scale, the STD index of *R. pseudoacacia* in the two locations was mainly positively correlated with the summer precipitation and drought index (SPEI) ( $P < 0.05$ ), and the *R. pseudoacacia* in BS was significantly negatively correlated with the average precipitation and SPEI in November of the previous year ( $P < 0.05$ ). The  $WUE_i$  of trees in MQ was significantly positively correlated with the average temperature and maximum temperature in March and August ( $P < 0.05$ ), while that of trees in BS was significantly positively correlated with the average temperature, maximum temperature and minimum temperature from March to April of the current year, and June to July of the previous and current year ( $P < 0.05$ ). The path analysis model showed that on the annual scale, the STD index of *R. pseudoacacia* in BS had a significant positive effect on the average precipitation and average temperature ( $P < 0.05$ ), while the *R. pseudoacacia* in MQ had no significant response to climate factors. The annual average temperature had significantly positive effect on  $WUE_i$  of trees at both the locations ( $P < 0.05$ ). [Conclusion] The average precipitation is the dominant factor influencing the radial growth of *R. pseudoacacia* at both the locations, and the sensitivity of growth of trees in BS is higher than that of trees in MQ. The average temperature is the dominant factor influencing  $WUE_i$  at the two locations, and the  $WUE_i$  of trees in BS is more sensitive to the temperature than that of trees in MQ.

**Keywords:** *Robinia pseudoacacia*; tree rings; radial growth; stable carbon isotopes; intrinsic water use efficiency

(责任编辑: 徐玉秀)